

Consideração da vida útil na reabilitação de concreto – um benefício à sustentabilidade.

P. C. Stivaros^{1*}

* Autor de Contato: pstivaros@geiconsultants.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.814>

Recebido: 27/09/2024 | Correções recebidas: 18/03/2025 | Aceito: 28/04/2025 | Publicado: 01/05/2025

RESUMO

Este artigo discute várias práticas de projeto e manutenção de reparos para produzir estruturas de concreto duráveis e sustentáveis. A ênfase é dada à inspeção e avaliação de estruturas de concreto deterioradas. Os princípios de inspeção e reparo são demonstrados por meio de estudos de caso de estruturas de concreto deterioradas. A preservação do concreto é um fator importante na redução do consumo de recursos naturais e também contribui à economia. O concreto, como qualquer outro material de construção, é suscetível à deterioração durante sua vida útil. Reparar e prolongar a vida útil de estruturas de concreto contribui para a sustentabilidade geral. As decisões de inspeção e reparo devem ser baseadas em uma avaliação completa que consiste em inspeção visual, ensaios não destrutivos (NDT), ensaios de laboratório e uma análise com avaliação da vida útil.

Palavras-chave: reparação de concreto, sustentabilidade do concreto, avaliação estrutural, ensaios não destrutivos, vida útil.

Citar como: Stivaros, P. C. (2025), “*Consideração da vida útil na reabilitação de concreto – um benefício à sustentabilidade.*”, Revista ALCONPAT, 15 (2), pp. 205 – 217, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.814>

¹ Vice President, GEI Consultants, Inc., P.C., 1000 New York Avenue, Suite B, Huntington Station, NY, USA.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Péricles C. Stivaros contribuiu com todas as atividades na elaboração deste artigo.

Licença Creative Commons

Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2025.

Service life evaluation in concrete rehabilitation – a sustainability benefit.

ABSTRACT

This paper discusses several repair design and maintenance practices to produce durable and sustainable concrete structures. Emphasis is given in the assessment and evaluation of deteriorated concrete structures. The evaluation and repair principles are demonstrated through case studies of deteriorated concrete structures. Concrete preservation is an important consideration to sustain both economic and natural resources. Concrete, like almost any other building material, is susceptible to deterioration during its service life. Repairing and extending the service life of concrete structures contributes to overall sustainability of materials and resources. Assessment and repair decisions should be based on a thorough evaluation consisting of visual inspection, nondestructive Testing (NDT), laboratory testing, and a service life evaluation analysis.

Keywords: concrete repair, concrete sustainability, structural assessment, nondestructive testing, service life.

Evaluación de la vida útil en la rehabilitación de hormigón - un beneficio de sostenibilidad.

RESUMEN

Este documento analiza varias prácticas de reparación, diseño y mantenimiento para producir estructuras de concreto duraderas y sostenibles. Se hace hincapié en la valoración y valoración de estructuras de hormigón deterioradas. Los principios de evaluación y reparación se demuestran a través de estudios de casos de estructuras de hormigón deterioradas. La preservación del concreto es una consideración importante para mantener los recursos económicos y naturales. El hormigón, como casi cualquier otro material de construcción, es susceptible de deterioro durante su vida útil. Reparar y prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón contribuye a la sostenibilidad general de los materiales y recursos. Las decisiones de evaluación y reparación deben basarse en una evaluación exhaustiva que consista en una inspección visual, ensayos no destructivos (END), pruebas de laboratorio y un análisis de evaluación de la vida útil.

Palabras clave: reparación de hormigón, sostenibilidad del hormigón, evaluación estructural, ensayos no destructivos, vida útil.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org
Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Sustentabilidade é um conceito amplo que abrange diversos objetivos, como desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e desenvolvimento ambiental. Em termos simples, sustentabilidade é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades. A indústria da construção civil em todo o mundo consome uma grande quantidade de recursos naturais, além de contribuir para efeitos ambientais adversos. Portanto, a necessidade de desenvolver práticas de construção sustentáveis é importante. O concreto é, de longe, o material de construção mais utilizado. O concreto se elevou ao topo dos materiais de construção devido às suas vantagens sobre outros materiais de construção. O concreto é fácil e prontamente moldado em vários formatos e tamanhos, e é adaptável a qualquer aplicação, localização geográfica e clima. O concreto, se projetado, construído e mantido adequadamente, pode durar para sempre, e isso não é exagero! Portanto, o concreto pode e deve ser um material de construção sustentável.

Uma estrutura de concreto sustentável deve ser projetada, construída e mantida de forma que o impacto ambiental total durante seu ciclo de vida seja minimizado. O cimento Portland é o principal ingrediente do concreto. A fabricação de cimento é um processo que consome muita energia e inclui a moagem e o aquecimento de uma mistura de matérias-primas como calcário, argila, areia e minério de ferro em um forno rotativo. Esse processo produz emissões tóxicas e libera quantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂) no meio ambiente.

Os problemas ambientais de efeito estufa associados à produção de cimento e ao consumo de recursos naturais ditam o desenvolvimento de meios e procedimentos para melhorar a eficiência energética e ambiental da fabricação de cimento. Além disso, o uso de cimento deve ser minimizado e/ou parcialmente substituído por outros materiais cimentícios que sua produção requer menos energia e emite menos gases tóxicos. A minimização do uso de cimento pode ser alcançada por meio de um projeto estrutural adequado e eficiente e manutenção adequada após a construção. É muito importante desenvolver métodos eficazes de proteção para estruturas de concreto para estender sua vida útil e eliminar a necessidade de reparo ou reconstrução. Para estruturas de concreto deterioradas existentes, a extensão de sua vida útil é alcançada por meio de uma compreensão completa do tipo, causa e extensão do dano e da implementação de reparos e manutenção adequados.

O desenvolvimento de planos sustentáveis na indústria da construção civil começa na concepção do projeto e se estende à construção e além de sua vida útil. Este artigo discute diversas considerações de projeto, construção e manutenção para produzir estruturas de concreto duráveis. A ênfase é dada à avaliação e ao reparo de estruturas de concreto deterioradas, utilizando modelos de avaliação de vida útil.

2. CONEXÃO ENTRE AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL E SUSTENTABILIDADE

O principal objetivo dos planos de desenvolvimento sustentável inclui a conservação de recursos e a redução de resíduos. Portanto, quanto mais tempo as estruturas estiverem em serviço, menor será o impacto ambiental ao longo de sua vida útil. As estruturas estão sujeitas a danos e deterioração principalmente devido ao uso e aos efeitos ambientais. As abordagens tradicionais frequentemente envolvem a substituição completa, o que consome muitos recursos e é prejudicial ao meio ambiente. A avaliação da vida útil fornece uma abordagem mais sustentável, avaliando a vida útil restante das estruturas de concreto existentes e identificando técnicas de reabilitação apropriadas. O reparo e, portanto, o prolongamento da vida útil das estruturas de concreto contribui para a sustentabilidade geral dos materiais e recursos. A avaliação estrutural, a avaliação da vida útil e a

reabilitação de estruturas de concreto deterioradas são necessárias para estender sua vida útil, manter a integridade estrutural, mas também para promover práticas sustentáveis na construção e na gestão de infraestrutura.

Em resumo, a avaliação da vida útil é uma ferramenta essencial na avaliação do comportamento de estruturas de concreto deterioradas, que pode contribuir a reparos adequados e duráveis a longo prazo, maximizando assim a vida útil das estruturas e minimizando seu impacto ambiental.

3. SUSTENTABILIDADE NO PROJETO DE CONCRETO

O projeto estrutural de concreto é geralmente regido por códigos de construção e normas e regulamentos nacionais e locais. Os códigos (normas) de construção do passado enfatizavam a resistência e a segurança das estruturas com poucos requisitos de durabilidade. A indústria do concreto reagiu positivamente ao desenvolver padrões de projeto e construção que incorporam requisitos de proteção e durabilidade em linha com os planos de desenvolvimento sustentável. O Instituto Americano de Concreto (ACI) iniciou uma campanha de sustentabilidade e implementou diversas melhorias no desenvolvimento sustentável em suas publicações de projeto, construção e materiais, incluindo o documento ACI 130R-19, Relatório sobre o Papel dos Materiais na Construção Sustentável de Concreto (ACI 130R, 2019). O Instituto Americano de Arquitetos (AIA) desenvolveu um guia para proprietários e engenheiros/arquitetos sobre como elaborar contratos para projetos com objetivos sustentáveis (Documento AIA D 503, 2013).

Engenheiros estruturais podem influenciar significativamente os impactos ambientais de estruturas de concreto por meio de decisões de projeto e especificações. A seguir, alguns fatores que afetam o desempenho e a sustentabilidade das estruturas de concreto:

- Cargas de projeto: Ter uma estrutura que possa resistir a desastres sem sofrer danos significativos é considerado mais sustentável.
- Eficiência Estrutural: Otimize o desempenho e minimize o desperdício. Não superdimensione os elementos.
- Durabilidade: Uma combinação de bons detalhes de projeto e proteção, juntamente com uma dosagem de concreto visando durabilidade, pode resultar em uma estrutura de concreto mais sustentável.
- Construtibilidade: Elementos menores, com armaduras congestionadas e dimensões fora do padrão, exigem mais energia e esforço. Além disso, especificações prescritivas podem tornar o projeto menos sustentável.
- Eficiência energética: edifícios de concreto geralmente são mais eficientes em termos energéticos.
- Dosagem do Concreto: As proporções dos ingredientes utilizados nas dosagens do concreto podem ter um impacto significativo na pegada ambiental. As especificações de desempenho permitiriam a otimização da mistura, melhorariam a qualidade do produto, estimulariam a inovação, reduziriam o custo e o tempo de construção, reduzindo, ao mesmo tempo, a pegada ambiental. Uma mistura de concreto sustentável deve incluir:
 - Minimizar a pegada energética e de CO₂. Usar materiais cimentícios alternativos, como adições.
 - Minimizar o uso de água potável. Utilizar aditivos redutores de água.
 - Minimizar o desperdício.
 - Aumentar o uso de materiais reciclados

Sustentabilidade e durabilidade andam de mãos dadas. A experiência nos mostrou que edifícios de concreto não colapsam rapidamente mas podem deteriorar-se bem rapidamente. A durabilidade está relacionada à capacidade das estruturas de resistir à ação do intemperismo, ataque químico, abrasão e outras condições potenciais de deterioração durante o serviço. Projetar para durabilidade

é inegavelmente o melhor investimento econômico e social, pois reduz os custos de manutenção e reparo e estende a vida útil da estrutura. As práticas de projeto de durabilidade podem incluir dosagens adequadas de concretos, cobrimento suficiente sobre a armadura de aço, cura e proteção adequadas em idade precoce e aplicação de revestimentos protetores. O plano de desenvolvimento de sustentabilidade mais eficaz é evitar a necessidade de manutenção e reparos extensivos. O Comitê 160 do ICRI, Ciclo de Vida e Sustentabilidade (2015), desenvolveu um White Paper sobre sustentabilidade para reparo e manutenção de edifícios de concreto e alvenaria. O artigo do ICRI (2015) argumenta que a proteção, a manutenção e os reparos proativos oferecem as vantagens sustentáveis inerentes definitivas em termos de custo, longevidade, energia e até mesmo responsabilidade cultural.

Generally, a sustainable structural design should include both strength and durability requirements, as well as other sustainability considerations such as structural efficiency, constructability considerations, energy efficiency, and most importantly the concrete mix design with minimizing the use of cement and water.

Geralmente, um projeto estrutural sustentável deve incluir requisitos de resistência e durabilidade, bem como outras considerações de sustentabilidade, como eficiência estrutural, considerações de construtibilidade, eficiência energética e, mais importante, um estudo de dosagem do concreto com minimização do uso de cimento e água.

4. INSPEÇÃO E AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

Estruturas estão sujeitas a danos e deterioração principalmente devido ao uso e aos efeitos ambientais. Inspeções e reparos periódicos podem evitar reparos longos e dispendiosos. Uma estrutura de concreto danificada requer uma avaliação estrutural para determinar a causa e a extensão do dano. Para projetar um reparo durável e, portanto, sustentável, é necessário ter um profundo conhecimento dos mecanismos de deterioração, da taxa de deterioração e dos efeitos potenciais das condições deterioradas existentes. É importante saber se o dano é devido a efeitos relacionados ao estresse ou a efeitos ambientais, como infiltração de água e ação de congelamento e degelo. Igualmente importante é verificar as propriedades físicas e as características de durabilidade do concreto danificado. Certas questões precisam ser abordadas antes do reparo e da reabilitação. O concreto a ser recuperado está em boas condições? Qual é a sua resistência à compressão in loco? Está carbonatado e com potencial de desenvolver a corrosão do aço? Inclui algum contaminante químico? Sofreu ataque químico com potencial de danos futuros? Inclui microfissuras internas?

O processo e avaliação inclui o desenvolvimento de um programa de investigação, incluindo levantamentos de condições, ensaios não destrutivos, ensaios laboratoriais de materiais e verificação do projeto estrutural. A avaliação deve incluir informações sobre o tipo, a causa e a extensão dos danos, bem como a manutenção e o monitoramento futuros necessários. Um elemento importante do programa de investigação é a avaliação de alternativas de reparo por meio de uma avaliação da vida útil. Uma avaliação inadequada pode levar a detalhes de reparo e especificações de materiais inadequados, o que resultará em falha prematura do reparo e acelerará os danos a outras partes não danificadas da estrutura. Assim, o nível de sustentabilidade é reduzido.

O ACI 364 (2019) fornece procedimentos gerais para a avaliação de estruturas de concreto antes da reabilitação e do reparo. O ACI 562 (2019) codifica os requisitos mínimos para avaliação, reparo e reabilitação de estruturas existentes. Outros códigos, normas da indústria e guias estão disponíveis, fornecendo informações sobre como lidar com as questões complexas de um programa de reparo, tais como:

- ACI 201.1R (2008), Guide for Conducting Visual Inspection of Concrete in Service
- ACI 224.1R (2007), Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete

- ACI 228.2R (2013), Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete Structures
- ACI 546R (2023), Guide to Concrete Repair
- ACI 563 (2018), Specifications for Repair of Concrete in Buildings
- ICRI No. 210.4 (2021), Guide for Nondestructive Evaluation Methods for Condition Assessment, Repair, and Performance Monitoring of Concrete Structures
- ICRI No. 310.1R (2008), Guide for Surface Preparation for the Repair of Deteriorated Concrete Resulting from Reinforcing Steel Corrosion

Em geral, uma avaliação estrutural adequada levará a reparos estruturais apropriados, bem como reparos duráveis que estenderão a vida útil das estruturas de concreto e, assim, contribuirão para a sustentabilidade geral de materiais e recursos.

5. AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL – CONCEITO GERAL

A Vida Útil Técnica de um elemento de concreto é o tempo em serviço até que um estado inaceitável definido seja atingido, como lascamento do concreto, nível de segurança abaixo do aceitável ou falha de elementos. Um elemento importante do projeto de reparo é a vida útil e a análise de custos dos reparos. Uma avaliação da vida útil deve ser realizada em estruturas de concreto para determinar o potencial de deterioração futura e avaliar métodos alternativos de reparo.

A deterioração de estruturas de concreto armado deve-se principalmente à corrosão do aço de reforço embutido no concreto. A corrosão do aço é geralmente atribuída à entrada de cloretos e outros produtos químicos corrosivos na massa de concreto. Em geral, a avaliação da vida útil de uma estrutura de concreto em reparo baseia-se em modelos probabilísticos que preveem o tempo necessário para que contaminantes atinjam o aço embutido no concreto e iniciem a corrosão. A análise considera as características específicas do concreto, os danos existentes, as propriedades do material, as condições ambientais locais e os tratamentos de proteção das superfícies de concreto expostas.

Em resumo, o benefício sustentável proporcionado pela avaliação da vida útil reside no fato de que ela deve ser realizada no nível de prevenção desde o projeto. Isso implicará em economias substanciais no uso de recursos e materiais, reduzindo, assim, o impacto ambiental das estruturas. Se a avaliação for iniciada a partir da necessidade de reparo, o benefício será considerá-la como ponto de partida para a prevenção do problema recorrente e, assim, prolongar a vida útil da estrutura.

6. DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE REPARO

O projeto e os detalhes do reparo necessário devem ser desenvolvidos com base na avaliação e no estudo de caso. Os códigos e normas aplicáveis ao projeto e construção originais do edifício, bem como o código base do projeto de reparo, devem ser determinados. Os materiais de reparo devem ser compatíveis com a estrutura e com o ambiente de serviço. A manutenção prevista deve ser considerada na seleção de materiais e métodos de reparo. De acordo com a norma ACI 562 (2019), o projeto de reparo deve considerar a resistência (capacidade de carga dos elementos danificados), a operacionalidade estrutural (como estabilidade geral, resistência ao fogo, deflexão, fissuras e vibração excessiva) e a durabilidade a longo prazo (capacidade dos elementos estruturais de resistir à deterioração).

A restauração da resistência dos elementos é geralmente exigida pelos códigos (normas) de construção aplicáveis. Uma estrutura deve ser restaurada à sua capacidade de carga originalmente projetada. Alguns requisitos de durabilidade, como o cobrimento de concreto à armadura, também

são exigidos pelas normas (códigos). Outros requisitos de durabilidade, como revestimentos protetores, geralmente não são exigidos pelas normas. No entanto, medidas de proteção têm um impacto significativo na vida útil das estruturas.

A eficácia e a longevidade de um reparo em concreto dependem muito da preparação da superfície, da aplicação do material de reparo e da proteção e cura do reparo. Portanto, um rigoroso programa de garantia da qualidade deve ser desenvolvido e procedimentos de inspeção devem ser especificados. O programa de garantia da qualidade deve incluir disposições para inspeção e testes para verificar a qualidade da mão de obra e dos materiais de reparo.

O ICRI (2015) discute vários princípios para reparos sustentáveis e duráveis de estruturas de concreto:

- Projeto de reparo: Recupere o máximo possível do material existente. Forneça medidas de proteção de superfície e proteja adequadamente as barras de aço para evitar corrosão.
 - Gestão de resíduos: Minimizar o desperdício e/ou reciclar o resíduo.
 - Use materiais de reparo “verdes”: reciclados, de origem local, duráveis, com vida útil considerada e fáceis de usar.
 - Técnicas de reparo sustentáveis: considere o impacto ambiental do método de remoção de concreto e inclua medidas de controle de corrosão da armadura.
 - Implementação de reparos: Estabelecer um programa de controle de qualidade.
- Monitoramento: inicie um programa de monitoramento e implemente manutenção preventiva.

Geralmente, um projeto de reparo sustentável deve incluir requisitos de resistência e durabilidade, bem como outras considerações de sustentabilidade, como recuperação e reutilização de materiais, minimização de resíduos, uso de materiais reciclados e consideração do impacto ambiental da demolição e descarte de materiais de construção.

7. ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E REPARO DE ESTRUTURAS DE SANEAMENTO

Os princípios de inspeção e avaliação de estruturas de concreto antes da reabilitação são demonstrados por um estudo de caso envolvendo o reparo de tanques de concreto em uma estação de tratamento de águas residuais. Ao contrário das estruturas de edifícios, as estruturas ambientais são construídas para durar e, de fato, alguns municípios exigem uma vida útil de 100 a 200 anos. Estações de tratamento, tubulações e outras instalações ambientais devem ser adequadamente projetadas, construídas e mantidas ao longo de seus ciclos de vida para sustentar os níveis de serviço necessários. Cuidar dessas estruturas é a chave para sua sustentabilidade e desempenho bem-sucedido.

Levantamento, avaliação e reparo de estruturas saneamento apresentam algumas diferenças distintas em comparação com estudos de estruturas do tipo de construção. As condições severas de exposição, com ataque contínuo dos elementos, a presença contínua de água e outros líquidos, o ataque contínuo de produtos químicos e a erosão da superfície causada pelo movimento de líquidos são algumas das diferenças que distinguem as estruturas hidráulicas de outras estruturas.

Este estudo de caso investiga a causa e a extensão da deterioração e desenvolve um projeto de reparo para tanques de concreto contendo líquidos em uma estação de tratamento de águas residuais. Os tanques de decantação de concreto da estação apresentavam extensa deterioração na forma de erosão superficial, fissuras, lascamento, corrosão das armaduras e outros sinais de desgaste e deterioração. O objetivo da investigação estrutural dos tanques de concreto era determinar o estado geral, a extensão dos danos, o tipo e o custo dos reparos de reabilitação necessários e a vida útil restante dos tanques de concreto.

Os objetivos do projeto foram os seguintes:

- identificar o tipo e a extensão do dano
- Determinar a qualidade e a resistência do concreto
- Avaliar o efeito dos danos na integridade estrutural
- Identificar e avaliar opções de reparo

Para atingir os objetivos acima, foi desenvolvido o seguinte programa de investigação e reparação:

- Revisão dos documentos de construção disponíveis
- Levantamentos de condições - inspeções visuais
- Ensaios destrutivos
- Ensaios não destrutivos
- Ensaios laboratoriais de amostras de concreto
- Avaliação da vida útil
- Avaliação estrutural
- Projeto de reparo
- Execução de reparos

Um programa de reparo bem-sucedido que restaure a integridade estrutural e maximize a vida útil de estruturas de concreto deterioradas depende do planejamento e da execução adequados da avaliação estrutural, bem como do projeto e da execução do reparo. Esse planejamento deve incluir o estabelecimento dos objetivos e expectativas do projeto, bem como a forma de alcançá-los.

7.1 Levantamento de Condições

As observações visuais foram realizadas de acordo com o ACI 201.1R (2008). As condições observadas incluíram: fissuras, deslocamentos, agregados expostos e erosão superficial, armaduras expostas, corrosão das armaduras e juntas de dilatação danificadas. Com base nas observações visuais, foi desenvolvido um programa detalhado de avaliação, que incluiu ensaios não destrutivos e ensaios laboratoriais de amostras de concreto. Os defeitos típicos identificados e os reparos realizados são ilustrados na Figura 1.



Figura 1. Colunas de concreto fissuradas, com deslocamentos e reparos. Armaduras expostas e corroídas.



Figura 2. Ensaio de Meia-Célula: Medição de potenciais de corrosão. GPR: Identificação de falhas internas e localização de vergalhões.

7.2 Ensaaios não destrutivos

Observações visuais fornecem informações apenas sobre danos facilmente visíveis. Danos ocultos dentro do concreto podem ser identificados usando métodos de ensaios não destrutivos, bem como ensaios destrutivos. Ensaios não destrutivos foram realizados em locais selecionados para confirmar a rigidez do concreto, identificar falhas internas, identificar corrosão potencial da armadura e detectar a localização e a profundidade da armadura. Os métodos de ensaios não destrutivos incluíram: ensaios de cobrimento das armaduras, ensaios de radar de penetração no solo (GPR), eco de impacto, ultrassom e potencial de corrosão para medir os potenciais de corrosão. A descrição dos métodos não destrutivos é fornecida em ACI 228.2R (2013). Fotografias dos ensaios não destrutivos são ilustradas na Figura 2. O resumo dos ensaios não destrutivos inclui:

- Os testes de cobertura das armaduras e GPR indicaram que a armadura de aço estava localizada em profundidades que variavam de espessuras de até 75 mm, com a maioria das armaduras localizadas a 35 mm a 50 mm da superfície. O cobrimento de projeto das armaduras era de 50 mm
- Os testes de impacto-eco e resposta ao impulso não indicaram deficiência estrutural significativa nos tanques. As paredes dos tanques eram sólidas, sem falhas e fragilidades estruturais generalizadas. No entanto, os testes indicaram a existência de áreas dispersas com defeitos localizados, como delaminações superficiais, concreto segregado e vazios em todos os tanques de concreto. Esses defeitos foram identificados principalmente nos locais de barras de aço corroídas expostas, em locais de fissuras e ao longo das juntas de dilatação.
- O ensaio de potencial de corrosão indicou uma alta probabilidade de corrosão nas proximidades das armaduras expostas corroídas. A atividade de corrosão diminui à medida que se afasta das armaduras expostas. Não foi detectada atividade de corrosão generalizada.
- Testes em áreas suspeitas mostraram que armaduras localizadas em profundidades menores que 12 mm apresentavam corrosão leve a severa, enquanto barras em profundidades maiores apresentavam corrosão leve ou nenhuma.

7.3 Ensaio de laboratório

O objetivo dos ensaios laboratoriais, em amostras de concreto, foi determinar a resistência e a qualidade do concreto, detectar ataques químicos e determinar as características de durabilidade a longo prazo do concreto. Os ensaios laboratoriais incluíram a resistência à compressão do concreto,

o teor de cloreto, o teor de sulfato, a alcalinidade (pH) e o exame petrográfico. O resumo dos ensaios laboratoriais inclui:

- A resistência à compressão do testemunho de concreto variou de aproximadamente 30 MPa a 70 MPa. A resistência de projeto do concreto era de 30 MPa
- O teor de cloreto variou de 0,21 a 0,77% em relação ao peso de cimento Portland nos 25 mm exteriores e de 0,12 a 0,44% nas profundidades de 50 mm a 75 mm. Os níveis de cloreto estão bem acima do prescrito no ACI 318
- O ACI 318 (2019) sugeriu um limite de 0,15% (serviço seco) ou 0,08% (serviço úmido) acima do qual pode ocorrer corrosão do aço de reforço
- O teor de sulfato variou de menos de 0,0011% a 0,0016% em massa de concreto na superfície e abaixo de 0,001% em profundidades de 75 mm. Esses teores de sulfato estavam bem abaixo dos limites sugeridos pelo ACI 318 (2019) para atividade de corrosão.
- A profundidade da carbonatação variou bastante atingindo uma profundidade máxima de 12 mm da superfície do concreto.
- Os níveis de alcalinidade (pH) do concreto variaram entre 10 e 12, da superfície até 75 mm de profundidade. Os valores de pH medidos não caíram abaixo do nível crítico de 8,5, no qual a película protetora de passivação à corrosão do aço é rompida, podendo ocorrer corrosão.
- O ensaio de petrografia indicou o seguinte
 - Concreto de boa qualidade com agregados densos e bem granulados, concreto bem adensado.
 - A superfície de concreto exposta estava em más condições. As superfícies de concreto apresentavam grãos de areia expostos e extensos agregados expostos, apresentando perda de pasta e erosão. A exposição prolongada à umidade e ao fluxo de água, bem como o ataque químico dos poluentes da água, foram determinados como os mecanismos principais de deterioração.
 - Não houve evidência de reações álcali-silica ou outras reações deletérias entre a pasta de cimento e o agregado.
 - Microfissuras foram observadas principalmente nos primeiros 50 mm.
 - O concreto não continha ar incorporado, o que o tornava vulnerável à ação do gelo e do degelo. Como os tanques estão sempre cheios de água, não foram observados danos por gelo e degelo nos testemunhos de concreto.

8. AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL

Foi realizada uma avaliação da vida útil de cada tipo de tanque contendo líquido ou outros elementos de concreto suspeitos em toda a planta. Amostras de concreto foram extraídas de cada tipo de estrutura, bem como amostras de águas residuais serão coletadas para testes em laboratório. As amostras de concreto foram testadas para determinar as propriedades iônicas e de transporte de umidade do concreto. As amostras de águas residuais foram testadas quanto ao pH e a várias concentrações de metais. Os dados coletados dos testes de concreto e água foram utilizados na avaliação da vida útil do concreto. Várias simulações foram realizadas para estimar o tempo para o início da corrosão da armadura de aço. As simulações incluíram o estado de deterioração do concreto e os vários métodos de reparo.

- a. Execução dos reparos mínimos necessários, incluindo reparo de fissuras, deslocamentos, juntas de dilatação e armaduras corroídas.
- b. Execução dos reparos mínimos necessários, conforme o Item (a), aplique uma argamassa de sílica ativa cimentícia de 12 mm de espessura e aplique um revestimento protetor de epóxi em todas as superfícies do tanque.

Os resultados das simulações são mostrados nas Figuras 3 e 4. Os resultados da simulação indicaram que os contaminantes de cloreto poderiam atingir 50 mm de profundidade e causar corrosão na armadura em aproximadamente sete a dez anos. Armaduras localizadas próximas à superfície, a menos de 50 mm, começarão a corroer em um tempo muito menor. Para armaduras localizadas a mais de 75 mm de profundidade, os cloretos levarão de 20 a 40 anos para afetar as armaduras. Quando uma camada protetora de argamassa e um revestimento epóxi foram introduzidos na simulação, o tempo para o início da corrosão das barras de aço aumentou para bem mais de 40 anos.

Em resumo, os resultados das simulações de vida útil indicam que, se o concreto for apenas reparado e as fissuras injetadas, a corrosão da armadura provavelmente recomeçará em poucos anos. A simulação sugere que um reparo que remova o concreto danificado, o substitua por argamassa densa e sele com um revestimento protetor provavelmente protegerá a armadura da corrosão por muito mais de 40 anos, aumentando assim a vida útil das estruturas e minimizando seu impacto ambiental.

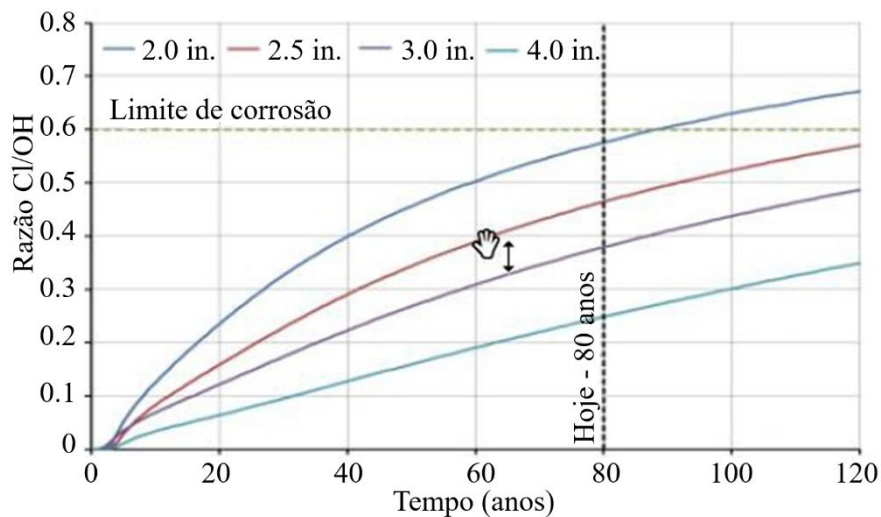


Figura 3. Evolução da relação cloreto/hidróxido ao longo do tempo e início esperado de corrosão do aço em diferentes profundidades com reparos mínimos para preservar o concreto como está.

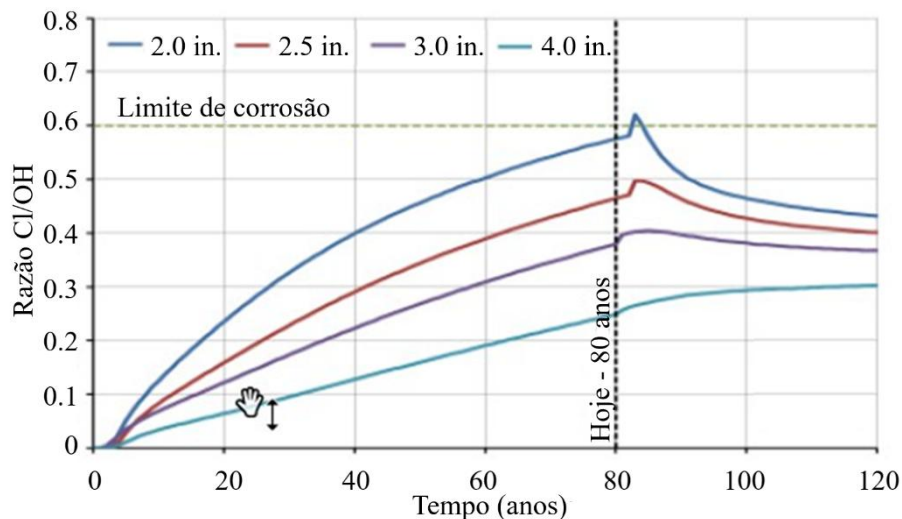


Figura 4. Evolução da relação cloreto/hidróxido ao longo do tempo e início esperado de corrosão da armadura em diferentes profundidades usando estratégia de reparo robusta.

9. PROJETO DE REPARO

A filosofia do projeto de reparo para este projeto foi dupla: restaurar a integridade estrutural dos tanques de concreto e garantir sua durabilidade a longo prazo após os reparos. O projeto de reparo sugerido incluiu métodos e materiais de reparo duráveis e de última geração. Assim, a durabilidade foi aumentada e a vida útil dos tanques foi estendida. A durabilidade a longo prazo dos reparos e dos materiais é uma questão importante de sustentabilidade, pois reduz os impactos ambientais das frequentes substituições e reparos, com os resíduos, a fabricação e o descarte de entulho associados. A avaliação da vida útil indicou que o uso de um revestimento protetor na superfície do concreto aumentará a vida útil da estrutura em duas vezes em comparação à opção de realizar apenas os reparos mínimos necessários.

O projeto de reparo também considerou a minimização dos materiais de reparo. A intenção do projeto era reparar apenas áreas danificadas locais, sem substituições completas ou aplicação de uma camada extra contínua de concreto sobre as paredes e pisos existentes do tanque.

As especificações do projeto de concreto incluíam disposições de sustentabilidade com relação aos materiais utilizados e ao controle de qualidade. As especificações incluíam materiais compatíveis com os substratos existentes e tinham requisitos para garantia de qualidade, incluindo protótipos e ensaios nos reparos. As especificações também permitiam o uso de materiais cimentícios suplementares, como cinza volante, cimento de escória e sílica ativa. Assim, reduzindo o impacto ambiental do CO₂, bem como usando materiais cimentícios que podem melhorar a durabilidade a longo prazo do concreto. A cinza volante geralmente substitui até 25% do cimento, o cimento de escória substitui até 60% ou mais, e a sílica ativa até 8%.

Também foram incluídas sugestões para o tratamento dos resíduos. O concreto danificado removido poderia ser reciclado para produzir concreto novo, que poderia ser usado para outras necessidades de concreto moldado in loco da usina, como pavimentos, base de fundação para calçadas ou como material de preenchimento.

De modo geral, um projeto de reparo sustentável para estruturas ambientais deve incluir tanto a restauração da integridade estrutural quanto a maximização da durabilidade e da vida útil dos reparos a longo prazo. Neste estudo de caso, isso foi alcançado por meio de uma avaliação adequada da vida útil, do desenvolvimento de detalhes de reparo apropriados, utilizando materiais de reparo de alta qualidade e da minimização de reparos e materiais, e, principalmente, da aplicação de um programa de controle de qualidade para garantir que o programa de reparo seja executado de forma eficiente e adequada.

10. OBSERVAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma discussão sobre questões de sustentabilidade relacionadas à construção em concreto e aos reparos em concreto, com ênfase na avaliação e reparo de estruturas de concreto deterioradas usando modelos de avaliação de vida útil.

A vida útil de uma estrutura de concreto adequadamente projetada, construída e mantida pode ser estendida com inspeções e reparos periódicos ao longo de sua vida útil. Concreto duradouro é concreto sustentável. A avaliação da vida útil ajuda a quantificar os benefícios da reabilitação em relação à substituição, enfatizando a sustentabilidade.

Um projeto de concreto que considere os requisitos de durabilidade na proteção e no material é o melhor investimento econômico e social; os custos de manutenção e reparo são reduzidos, bem como a vida útil é estendida. O plano de desenvolvimento sustentável mais eficaz é evitar a necessidade de manutenção e reparos extensivos. O objetivo é diminuir o impacto a longo prazo das estruturas, criando estruturas duráveis.

A avaliação e o estudo de estruturas de concreto danificadas antes da reabilitação são de suma importância. Uma avaliação estrutural e uma avaliação da vida útil adequadas são pré-requisitos para a durabilidade a longo prazo do concreto e sua integridade estrutural e, portanto, sua sustentabilidade. As simulações da vida útil devem incluir o estado de deterioração do concreto e os diversos métodos de reparo.

Um trabalho de reparo satisfatório e duradouro exige uma compreensão completa do mecanismo e da extensão da deterioração, bem como das propriedades físicas e químicas do material de concreto existente; portanto, é realizada uma preparação adequada da superfície e são aplicados materiais de reparo compatíveis.

11.REFERÊNCIAS

- ACI Committee 130 (2019), *“Report on the Role of Materials in Sustainable Concrete Construction (ACI 130R-19)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 34 pp.
- AIA Document D503 (2013), *“Guide for Sustainable Projects,”*, American Institute of Architects, Washington, DC, 20120, 67 pp.
- ICRI Committee 160 (2015), *Life Cycle and Sustainability, Sustainability for Repairing and Maintaining Concrete and Masonry Buildings*, 13 pp.
- ACI Committee 364 (2020), *“Guide for Evaluation of Concrete Structures before Rehabilitation (ACI 364.1R-20)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 24 pp.
- ACI Committee 562 (2019), *“Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary (ACI 562-19)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 94 pp.
- ACI Committee 201 (2008), *“Guide for Conducting Visual Inspection of Concrete in Service (ACI 201.1R-08)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 15 pp.
- ACI Committee 224 (2007), *“Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete (ACI 224.1R-07)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 22 pp.
- ACI Committee 228 (2013), *“Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete Structures (ACI 228.2R-13)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 82 pp.
- ACI Committee 546R (2023), *“Guide to Concrete Repair (ACI 546R-23)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 59 pp.
- ACI Committee 563 (2019), *“Specifications for Repair of Concrete in Buildings (ACI 563-18)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 40 pp.
- ICRI No. 210.4 (2021) *Guide for Nondestructive Evaluation Methods for Condition Assessment, Repair, and Performance Monitoring of Concrete Structures*, 28 pp.
- ICRI No. 310.1R (2008) *Guide for Surface Preparation for the Repair of Deteriorated Concrete Resulting from Reinforcing Steel Corrosion*, 8 pp.
- ACI Committee 318 (2019) *“Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19)”*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 623 pp.